

2足歩行ロボットの膝関節伸展歩容 - Knee Torque Index の最適化 -

山下将弘(九州大) 倉爪亮(九州大) 米田完(東工大) 長谷川勉(九州大)

Straight Legged Walking of a Biped Robot Optimization of Knee Torque Index

*Masahiro YAMASHITA(Kyushu Univ.), Ryo KURAZUME(Kyushu Univ.), Kan YONEDA(Tokyo Institute of Technology), Tsutomu HASEGAWA(Kyushu Univ.)

Abstract— This paper describes a methodology for generating a straight legged walking pattern. This method is based on the idea of the sway compensation trajectory. The basic idea is, 1) when the knee joint angle is already 180 degrees and the ZMP error is large, the waist position is lowered, 2) when the knee joint angle is less than 180 degrees, the waist position is modified so that the KTI, which indicates how knee joints are utilized efficiently, is minimized. The effectiveness of the proposed method is verified through computer simulations and walking experiments using HOAP-1.

Key Words: Biped robot, Knee joint, Energy efficiency, Human-like motion

1. 序論

2足ヒューマノイドロボットは、機械システムに対してユーザーが受ける恐怖感や威圧感の低減や社会基盤との親和性に優れているため、福祉施設での医療サポートやエンターテイメント分野での活躍が期待されている。このようなヒューマノイドロボットが人間環境で共存していくために、ロボットはユーザーに違和感を与えないよう人間らしく自然に振舞うことが重要である。しかし、現在の2足ヒューマノイドロボットの動作は不自然であるものが多い。例えば、多くの2足ロボットは腰の位置を低く一定に保ち、膝を曲げた状態で歩行している。これはロボットの膝関節が伸び、自由度が縮退したときにはZero Moment Point(ZMP)制御が困難になるためである。一方、人間は上体の上下運動、腰、膝そして足首の関節をうまく使い、十分な自由度を保ちながら歩行している。膝を伸ばすことによって、体重を支えるためのトルクが少なくて済むため、エネルギー効率も高い。

そこで、我々はこれまでに、膝関節を利用した歩容の評価指標としてKnee Stretch Index(KSI)を提案し、KSIを最小化する膝関節伸展歩容を示した[1]。本稿では多質点モデルに基づくより厳密な評価指標としてKnee Torque Index(KTI)の提案、およびKTIを最小化する膝関節伸展歩容を示し、人間らしい自然な歩行動作とエネルギー効率の向上を実現したので報告する。

2. 2足歩行ロボットの3D揺動歩容

3D揺動歩容[2]とは、ロボットの歩行速度や加速度、揺動幅、支持脚対角線を入力パラメータとして、安定した歩行を実現するZMP軌道と重心軌道を導くものである。

2-1 3D揺動歩容

以下、ロボットの腕、脚の質量は胴体に比べて十分小さいと仮定し、ロボット全体を (x_g, y_g, z_g) に置かれた単質点モデルで考える。まず、床面が平面で、ロボットの重心の床面からの高さ z_g が一定であるとすると、床面上のZMPの位置 $(x_{zmp}, y_{zmp}, 0)$ は、

$$\begin{pmatrix} x_{zmp} \\ y_{zmp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \end{pmatrix} - A \begin{pmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g \end{pmatrix} \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 $A = \frac{z_g}{g}$ である。次に、両脚の足裏の中心を結んだ対角線を

$$x \cos \theta + y \sin \theta = d \quad (2)$$

とすると、安定歩行を実現するためには、この線上にZMPが存在しなければならない。このことから、重心軌道は

$$\cos \theta (x_g - A \ddot{x}_g) + \sin \theta (y_g - A \ddot{y}_g) = d \quad (3)$$

を満たさなければならない。ここで、ロボットの進行方向を x 軸方向、それに垂直な方向を y 軸方向とすると、式(3)を満足する重心の移動加速度は

$$x_g = C_1^x e^{\frac{t}{\sqrt{A}}} + C_2^x e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} + a_2^x t^2 + a_1^x t + a_0^x \quad (4)$$

$$y_g = C_1^y e^{\frac{t}{\sqrt{A}}} + C_2^y e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} + a_2^y t^2 + a_1^y t + a_0^y \quad (5)$$

となる。上式は $x_g - A \ddot{x}_g$ 、 $y_g - A \ddot{y}_g$ の特殊解および一般解の和である。

3. 膝関節伸展歩容

ここではより人間に近い歩行動作の計画法として、胴体の上下動による膝関節の伸展を利用した手法を示

す．まず膝関節の伸展を利用した歩容の評価指標 Knee Stretch Index(KSI) 及び Knee Torque Index(KTI) を以下のように定義する．

3.1 Knee Stretch Index

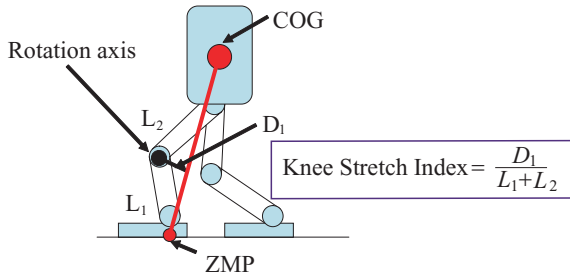


Fig.1 Definition of Knee Stretch Index

ロボットの全質量が重心にあり，足裏以外から受ける外力の影響を無視すると，地面から受ける力は重心と ZMP を結んだ直線に沿って足裏の ZMP に作用する．そのため，体重を支えるために膝関節に必要なトルクはこの直線と膝回転軸との距離に比例する．

以上より，図 (1) に示すように，重心と ZMP を結んだ直線の長さ D_1 とロボットの脚の長さ L_1, L_2 との比を Knee Stretch Index(KSI) と定義する．

$$Knee\ Stretch\ Index = \frac{D_1}{L_1 + L_2} \quad (6)$$

KSI は単質点モデルを仮定したときの全体重を支えるために膝関節に必要なトルクを示している．

3.2 Knee Torque Index

KSI はロボットを単質点モデルで近似して導出された評価指標であるが，より厳密に評価するためにはロボットを多質点モデルで考える必要がある．そこで次に Knee Torque Index(KTI) を提案する．

まず，床平面と平行で膝関節の回転軸を含んだ平面を考える．次に，この平面上での ZMP を従来の ZMP と同様の方法で求める．この ZMP を knee-plane ZMP(KZMP) と定義する．KZMP では ZMP と同様にロール，ピッチ軸周りのモーメントは発生しないので，膝関節の回転軸上に KZMP が存在するならば，体重を支えるために膝でのトルクは必要ない．

以上より，Knee Torque Index(KTI) は図 (2) に示すように，KZMP と膝回転軸との距離 D_2 とロボットの脚の長さ L_1, L_2 との比で次のように定義される．

$$Knee\ Torque\ Index = \frac{D_2}{L_1 + L_2} \quad (7)$$

3.3 KSI,KTI を用いた膝関節伸展歩容

前項で計画された式 (4) と (5) の軌道は，ロボットの腕や脚の質量を胴体に比べて十分小さいとして，単質点モデルを仮定して求められたものである．しかし，実際のロボットは多質点であるので目標 ZMP 軌道との間に誤差が存在する．したがって，より安定な歩容の実現のために，モデル化誤差の補償を行い，より正確な重心軌道と関節指令値を導く必要がある．この時，

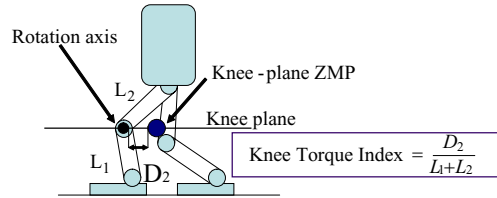


Fig.2 Definition of Knee Torque Index

同時に提案した指標の絶対値が最も小さくなる方向への重心軌道の補正量を求め，膝関節を伸ばすことでよりエネルギー効率の高い歩容を実現する．以下，繰り返し収束計算を用いて，モデル化誤差の補償と膝関節伸展歩容の自動生成を同時に行う手法を示す．

1) 理想の ZMP 軌道及び重心軌道 X_g^0 を単質点モデルによって近似的に式 (1), (4), (5) から求める．

2) 現在の重心軌道 X_g^n から基準点 (腰位置) や手足の関節軌道 Φ^n を計算する．ただし，手先，脚先の軌道はあらかじめ設計されたものを用い，収束計算による変更はないものとする．

3) 多質点モデルでの ZMP 軌道 $X_{zmp} = (x_{zmp}, y_{zmp}, 0)$ を以下の式により計算する．

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i (r_{ix} (\ddot{r}_{iz} + g) - r_{iz} \ddot{r}_{ix}) - I_i \dot{\omega}_{iy}}{\sum_{i=1}^N m_i (\ddot{r}_{iz} + g)} \quad (8)$$

$$y_{zmp} = -\frac{\sum_{i=1}^N m_i (-r_{iy} (\ddot{r}_{iz} + g) + r_{iz} \ddot{r}_{iy}) - I_i \dot{\omega}_{ix}}{\sum_{i=1}^N m_i (\ddot{r}_{iz} + g)} \quad (9)$$

4) xz 平面上 (x 方向:進行方向, z 方向:上下方向) にロボットの重心を中心とした半径 r の円を決め，その円周上に重心軌道を微小移動させる．移動後の重心軌道を $X_g^{ref} = (x_g^{ref}, y_g^{ref}, z_g^{ref})$ ，移動前の重心軌道を $X_g^{org} = (x_g^{org}, y_g^{org}, z_g^{org})$ とする．移動後の重心軌道からロボットの関節角度，実際の重心軌道 X_g ，評価指標 (KSI,KTI) を再計算する．もし，ここで再計算した指標がもとの指標よりも小さな値となっていた場合，重心軌道の補正量を $\Delta X = X_g - X_g^{org} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ とする．この作業を半径 r の円周上のいくつかの点で行い，この中で最も指標の小さくなる方向への軌道の修正量 ΔX を求める．

5) 理想の ZMP 軌道 X_{zmp}^{ref} と実 ZMP 軌道 X_{zmp} の差 $e_{zmp} = X_{zmp}^{ref} - X_{zmp}$ を求め，これを離散化した ZMP 軌道誤差 e_{zmp}^t を求める．目標の ZMP 軌道を X_{zmp}^{ref} ，この軌道に一致するために修正された重心軌道を X_g^{ref} ，現在の重心軌道を X_g とすると，目標の状態と現在の状態の誤差は次のようになる．

$$e_{zmp} = e_g - A\ddot{e}_g \quad (10)$$

ただし， $e_{zmp} = X_{zmp}^{ref} - X_{zmp}$ ， $e_g = X_g^{ref} - X_g$ とする．上式をサンプリング周期 Δt で離散化し

た ZMP 軌道誤差は次式で求まる .

$$\begin{aligned} e_{zmp}^t &= e_g^t - A\ddot{e}_g^t \\ &= e_g^t - A\frac{e_g^{t+1} - 2e_g^t + e_g^{t-1}}{(\Delta t)^2} \end{aligned} \quad (11)$$

- 6) ZMP 軌道誤差 $e_{zmp}^t \rightarrow 0$ となるような重心軌道の修正量 e_g^t を, 全離散時間の繰り返し計算により求める (第 1 の繰り返し計算). その重心軌道の修正量 e_g^t は

$$e_g^t = \frac{e_{zmp}^t + \frac{A}{(\Delta t)^2}(e_g^{t+1} + e_g^{t-1})}{1 + 2\frac{A}{(\Delta t)^2}} \quad (12)$$

で求められる .

ここで, 提案手法では,

1. 膝が伸びきっていない場合, 指標が最も小さくなる方向 ΔX に重心軌道を修正
2. 膝が伸びきった場合または ZMP 誤差が大きい場合には, ΔH だけ腰を落とす

という方針に基づき, 重心軌道を修正する .

具体的には, x, y 方向は $e_x^t \rightarrow e_x^t + \Delta x$, $e_y^t \rightarrow e_y^t + \Delta y$ と修正する . 膝関節角度が 180° 以内である (膝関節が伸びきっていない) とき, 腰の高さを $e_z^t \rightarrow e_z^t + \Delta z$ とする . また, 膝関節角度が 180° であって (膝関節が伸びきっている) ZMP 誤差が大きいとき, 腰の位置を $e_z^t \rightarrow e_z^t - \Delta H$ と修正する . しかし, 実験の結果, 上式で得られた重心軌道の修正量を現在の重心軌道に直接加えると, 重心軌道は ZMP の速度不連続点で振動的になる傾向がある . そのため, 滑らか拘束を加えた次式を最小にする e_g^t を求める .

$$\begin{aligned} \min_{e_x^t} & \left(e_x^t + \Delta x - \frac{e_{zmp}^t + \frac{A}{(\Delta t)^2}(e_x^{t+1} + e_x^{t-1})}{1 + 2\frac{A}{(\Delta t)^2}} \right)^2 + \\ & + k \left(e_x^t + X_x^t - \frac{e_x^{t+1} + X_x^{t+1} + e_x^{t-1} + X_x^{t-1}}{2} \right)^2 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \min_{e_y^t} & \left(e_y^t + \Delta y - \frac{e_{zmp}^t + \frac{A}{(\Delta t)^2}(e_y^{t+1} + e_y^{t-1})}{1 + 2\frac{A}{(\Delta t)^2}} \right)^2 + \\ & + k \left(e_y^t + X_y^t - \frac{e_y^{t+1} + X_y^{t+1} + e_y^{t-1} + X_y^{t-1}}{2} \right)^2 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \min_{e_z^t} (e_z^t + \Delta z)^2 + \\ k \left(e_z^t + X_z^t - \frac{e_z^{t+1} + X_z^{t+1} + e_z^{t-1} + X_z^{t-1}}{2} \right)^2 & (1) \\ \min_{e_z^t} (e_z^t - \Delta H)^2 + \\ k \left(e_z^t + X_z^t - \frac{e_z^{t+1} + X_z^{t+1} + e_z^{t-1} + X_z^{t-1}}{2} \right)^2 & (2) \end{cases} \quad (15)$$

- 7) $X_g^{ref} \leftarrow X_g + e_g^t$ より, 修正された重心軌道 $X_g^{n+1} = X_g^{ref}$ を求める .
- 8) 重心軌道の修正量 e_g^t が十分小さければ終了 .
- 9) 2) へ戻る . (第 2 の繰り返し計算)

4. 実験

4.1 計算機シミュレーション

KTI を最小化する膝関節伸展歩容を実装し, 計算機シミュレーションを行った .

図 (3), (4) にシミュレーション結果を示す . ただし, Duty 比 0.65, 歩行周期 4.0[sec.], 最大角加速度を 500[rad/sec.] である . 図 (3) は, 従来の膝を曲げ, 腰の高さが一定のままの歩行, 図 (4) は繰り返し収束計算を行い, KTI を最小化したときの歩行である .

図 (3) では常に膝が曲がっており, 人間と比べると不自然な動きをしている . 一方, 図 (4) では, ロボットは膝関節を伸展させて歩行させており, より自然な動きに近づいていることがわかる .

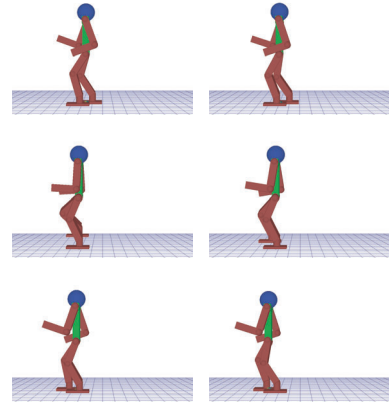


Fig.3 Conventional walking pattern

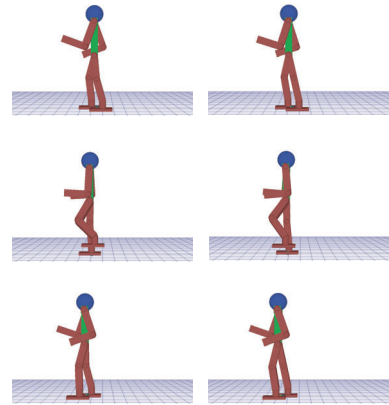


Fig.4 Proposed walking pattern

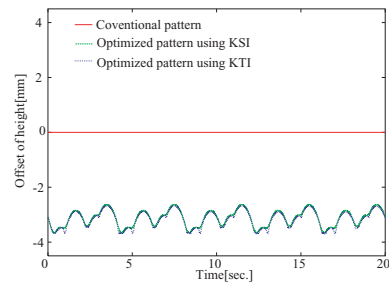


Fig.5 Height regulation by convergent calculation

図(5)に従来の手法とKSIを最適化した手法[1],およびKTIを最適化した手法のそれぞれに対し,腰の高さの変化を比較したものを示す.従来の手法が腰位置が一定なのに対して,KSIおよびKTIを用いた手法は胴体の上下動を利用した歩容であることが確認できる.また,KSIをKTIを最適化する手法で,上下動に大きな差は見られなかった.

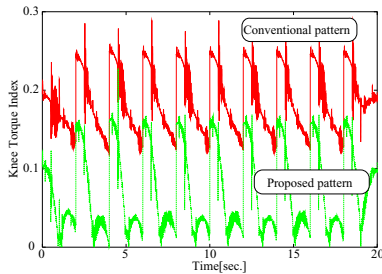


Fig.6 Comparison of Knee Torque Index

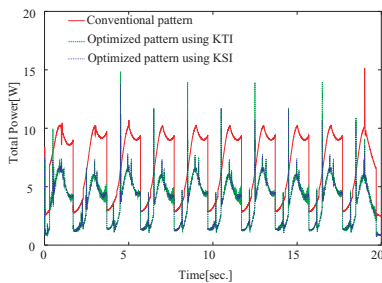


Fig.7 Total power consumption

Walking pattern	Energy consumption in one walking cycle[J]
Conventional pattern	14.2
KSI optimization	8.0
KTI optimization	8.0

Fig.8 Energy consumption

また,従来の手法と提案した手法の Knee Torque Index を比較したものを図(6)に示す. KTIは第3章で示したように,絶対値が0に近いほど膝関節を有効に活用したエネルギー効率の良い歩行であると考えられる.図(6)からわかるように,KTIは従来の手法の値より提案した歩容の値の方が0に近くっており,エネルギー効率の高い歩行であることが予想できる.そこで,図(7)と図(8)に全体の消費パワーとエネルギーの消費を計算した結果を示す.これから,KTIによる膝関節伸展歩容をのほう従来の手法よりも消費パワーおよびエネルギー消費の低減が確認できる.また,KSIとKTIを最適化する手法では,消費パワー,エネルギー消費量にほとんど差が見られず,どちらを用いてもほぼ同様の重心軌道が得られることがわかった.

5. 実機を用いた歩行実験 (HOAP-1)

2足歩行ヒューマノイドロボットHOAP-1を用いて,本

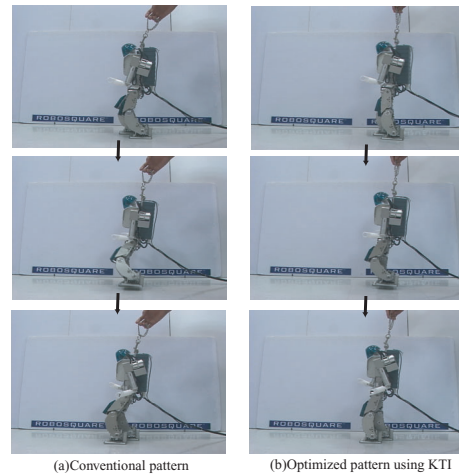


Fig.9 Walking experiment using HOAP-1

手法の有効性を示す実験を行った.

ここでの関節角度指令値はオフラインで計算されたものを与え,歩行パラメータはDuty比0.65,歩行周期4.0[sec.],最大角加速度を500[rad/sec.]とした.従来の手法による直進歩行の様子を図(9)(a)に,提案したKTIを最小にする膝関節伸展歩容による直進歩行の様子を図(9)(b)に示す.実機においても従来手法よりも膝関節伸展の動作をしていることが確認でき,またロボットが膝関節を伸ばしたときも,転倒することなく自然な歩行が実現できた.

6. まとめ

本論文では,Knee Torque Index(KTI)を利用したモデル化誤差の補償,膝関節伸展歩容の自動生成のための繰り返し収束計算を提案した.本手法は,膝関節が伸びきっていないときはKTIが最小になるように軌道を計画し,膝が伸びきってZMPの制御が困難なときは,腰を下げ必要な自由度を確保するというものである.シミュレーション実験と実機を用いた実験により,KTIを用いた膝関節伸展歩容が従来手法に比べて人間らしい自然な歩行を実現し,また消費エネルギーも低減できること,および提案したKTIと,より簡略なKSIを用いた手法ではほぼ同一の結果が得られることを確認した.

参考文献

- [1] 山下,倉爪,米田,長谷川:“2足歩行ロボットの膝関節伸展歩容”,ロボティクス・メカトロニクス講演会'05講演論文集,1A1-S-042,2005.
- [2] 倉爪,米田,田中,玉木,太田,長谷川:“2足歩行機械の3D揺動歩容”,日本ロボット学会誌,Vol.21, No7, pp.811-818,(2003).
- [3] R. Kurazume, T. Hasegawa, K. Yoneda, The Sway Compensation Trajectory for a Biped Robot, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.925-931, 2003.